

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Verifikace technického stavu strojů pro dopravu plynů

Verification of the Technical Condition
of the Gas Transport Machines

Student:

Richard Vintrocha

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. David Šeděnka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student: **Richard Vintrocha**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování**
Téma: **Verifikace technického stavu strojů pro dopravu plynů**
Verification of the Technical Condition of the Gas Transport Machines
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce se zabývejte problematikou technické diagnostiky zařízení pro dopravu plynů. Rozeberte tuto problematiku, navrhnete a zvažte vhodné metody pro sledování jejich technického stavu, zvolte vhodná místa pro umístění snímačů. Popište přístrojovou techniku a softwarové nastavení pro tuto aplikaci. Proveďte potřebná měření a vyhodnocení naměřených dat.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

ŠAFR, E. *Tribotechnika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 300 s. 04-243-84

ŠAFR, E. *Technika mazání*. 2. dopl. vydání, SNTL Praha - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970. 381 s. ISBN 04-010-70

HRADECKÝ, F., VLK, M. *Tribotechnika*. 1. vydání, Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 297 s.

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.


FS_SME_05_003 *Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce* Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2018. 20 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Šeděnka**

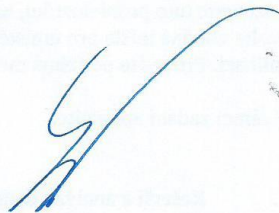
Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Richard Vintrocha

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dlouhá třída 477/31, Havířov-Město, 736 01

Anotace bakalářské práce

VINTROCHA, R. *Verifikace technického stavu strojů pro dopravu plynů: Bakalářská práce*. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2019, 57s. vedoucí Ing. Šeděnka, D.

Bakalářská práce se zabývá rozbořem turbínového oleje používaném v turbokompresoru a sledováním vibrací jak na turbokompresoru, tak na celém jeho soustrojí. Turbokompresor slouží pro dopravu koksárenského plynu v Koksovně Svoboda. Úvodní část práce je věnována informacím o samotné koksovně, výrobě a použití jejich koksárenských produktů. Dále jsou obsaženy základní informace o turbokompresorech a jejich nejčastějších závad. V dalších kapitolách je práce zaměřena na technickou diagnostiku, kde je popsána její úloha a v následující části vysvětlena její aplikace na našem zadání, proveden rozbor a zhodnocení výsledků naměřených dat.

Annotation of bachelor thesis

VINTROCHA, R. *Verification of the Technical Condition of the Gas Transport Machines: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2019, 57 p. Supervisor: Ing. Šeděnka, D.

The bachelor thesis deals with analysis turbine oil used in the turbocharger and vibration monitoring on both turbocharger and all next devices. The turbocharger is used to transport coke oven gas in the Svoboda Coking. Introduction part is devoted to information about the coking itself, production and use of their coke products. There are also basic information about turbocharger and their most common defects. In the following chapters the work is focused on technical diagnostics, where its role is described and in the following section its application on our assignment is explained, analysis and evaluation of the measured data results.

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1. Koksárenství na Ostravsku	13
1.1 OKK Koksovny, a.s.	13
1.2 Historie koksárenství na Ostravsku	13
1.3 Koksovna Svoboda	13
1.4 Program koksovny Svoboda	14
1.5 Výroba koksu v koksovně Svoboda	14
1.6 Proces výroby koksu v koksovně Svoboda	14
1.7 Produkty výroby koksu v koksovně Svoboda	16
2. Rychlostní kompresory	17
2.1 Turbokompresory	17
2.2 Radiální turbokompresory	18
2.3 Axiální turbokompresory	18
2.4 Závady na kompresorech	19
2.4.1 Lopatková frekvence ve spektru vibrací	19
2.4.2 Přidírání na ucpávkách	19
2.4.3 Nestabilita rotoru v kluzných ložiskách	19
2.4.4 Příčná trhлина v rotoru	19
2.4.5 Uvolnění základů, uvolnění ložiska, a nadměrná vůle kluzného ložiska	20
2.4.6 Turbulence a pompáž ve spektru vibrací	20
3. Technická diagnostika	21
4. Vibrodiagnostika	22
4.1 Snímače vibrací	22
4.1.1 Akcelerometry	22
4.1.2 Bezdotyková sonda	23
4.1.3 Snímač rychlosti	23
4.2 Rozdělení signálu	24
4.2.1 Deterministický signál	24
4.2.2 Náhodný (sochastický) signál	24
4.3 Měřené veličiny	25
4.3.1 Frekvence kmitání	25
4.3.2 Okamžitá výchylka	25
4.3.3 Rychlost	26
4.3.4 Zrychlení	26
4.4 Metody vyhodnocení vibrací	26
4.4.1 Fourierova transformace	26
4.4.2 FFT frekvenční analýza	27
4.5 Sledování trendu vibrací	28
4.6 Údržba stroje	29

4.6.1	Údržba na základě skutečného stavu objektu:	29
4.6.2	Údržba na základě časového plánu:	29
4.6.3	Údržba po poruše objektu	29
5.	Tribodiagnostika	30
5.1	Zjišťování technického stavu stroje pomocí maziva	30
5.2	Zjišťování degradace maziva	31
5.3	Odběr vzorku oleje	32
5.4	Trend stavu oleje	33
6.	Laboratorní zkouška vzorku oleje	34
6.1	Viskozita	34
6.2	Obsah vody	34
6.3	Kyselost	35
6.4	Celkové znečištění	37
6.5	Rentgenová spektrometrie	38
6.6	Infračervená spektrometrie	39
7.	Vibrodiagnostika měřeného zařízení	40
7.1	Popis měřeného zařízení	40
7.2	Příprava měření	42
7.3	Výběr Měřících míst	43
7.4	Výpočet otáčkových frekvencí	44
7.5	Vyhodnocení měření	46
7.5.1	Spektrum rychlosti	46
7.5.2	Spektrum zrychlení	46
7.6	Tabulky mezních hodnot	47
8.	Naměřené hodnoty z 15. 3. 2019	48
8.1	Frekvenční spektra	49
8.1.1	Ložisko L1	49
8.1.2	Ložisko L5	50
8.1.3	Ložisko L6	52
8.1.4	Ložisko L8	53
9.	Závěr	54
	Poděkování	55
10.	Seznam použité literatury	56

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam	Jednotka
ot·min ⁻¹	Otáčky za minutu	
atd.	A tak dále	
f	Frekvence kmitání	Hz
x	Okamžitá výchylka vibrací	m
v	Rychlost	m·s ⁻¹
a	Zrychlení	m·s ⁻²
FFT	Fast fourier transform	
Např.	Například	
KOH	Hydroxid draselný	
ČSN	Česká technická norma	
ISO	International organization for standartization (mezinárodní organizace pro normalizaci)	
f _{vs}	Otáčková frekvence vstupní hřídele převodovky	Hz
f _{vys}	Otáčková frekvence výstupní hřídele převodovky	Hz
f _t	Otáčková frekvence turbíny	Hz
f _{oz}	Otáčková frekvence spoluzabírajících ozubených kol	Hz

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 – KOKSOVNÁ SVOBODA [1]	13
OBRÁZEK 2 – VIZUALIZACE VÝROBNY KOKSU [1]	15
OBRÁZEK 3 – TLAKOVÝ AKCELEROMETR [12]	23
OBRÁZEK 4 – OKAMŽITÁ VÝCHYLKA VIBRACÍ [6]	25
OBRÁZEK 5 – SKLÁDÁNÍ A ZOBRAZENÍ VIBRACÍ VE FREKVENČNÍM SPEKTRU [6]	27
OBRÁZEK 6 – PRŮBĚH VIBRACÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE (VANOVÁ KŘIVKA) [6]	29
OBRÁZEK 7 – ODBĚR OLEJE TURBOKOMPRESORU V KOKSOVNĚ SVOBODA	32
OBRÁZEK 8 – VANOVÁ KŘIVKA MAZIVA DEGRADOVANÉHO VLIVEM OPOTŘEBENÍ [9]	33
OBRÁZEK 9 – MĚŘENÍ VSKOZITY KAPILÁRNÍM VSKOZIMETREM	34
OBRÁZEK 10 – MĚŘENÍ OBSAHU VODY COULOMETREM	35
OBRÁZEK 11 – SOFTWARE VYHODNOCENÍ PRVNÍHO POKUSU ZKOUŠKY KYSELOSTI	36
OBRÁZEK 12 – SOFTWARE VYHODNOCENÍ DRUHÉHO POKUSU ZKOUŠKY KYSELOSTI	36
OBRÁZEK 13 – MEMBRÁNOVÝ ULTRAFILTR PO PROFILTOVÁNÍ VZORKU	37
OBRÁZEK 14 – UKÁZKA JEDNÉ Z NALEZENÝCH VELKÝCH ČÁSTIC POD MIKROSKOPEM	37
OBRÁZEK 15 – ZKOUŠKA RENTGENOVÉ SPEKTROMETRIE	38
OBRÁZEK 16 – GRAFOVÉ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY POMOCÍ INFRAČERVENÉ SPEKTROMETRIE	39
OBRÁZEK 17 – MĚŘENÉ SOUSTROJÍ	40
OBRÁZEK 21 – SCHÉMA MĚŘENÉHO SOUSTROJÍ	40
OBRÁZEK 18 – ROZEBRANÝ TURBOKOMPRESOR	41
OBRÁZEK 19 – ROZEBRANÝ ROTOR TURBOKOMPRESORU	42
OBRÁZEK 20 – ROZEBRANÁ KLIZNÁ LOŽISKA	42
OBRÁZEK 23 – MĚŘENÍ VIBRACÍ NA TURBOKOMPRESORU	43
OBRÁZEK 24 - FREKVENČNÍ SPEKTRUM RYCHLOSTI V PÁSMU 1 HZ AŽ 800 HZ V HORIZONTÁLNÍM SMĚRU	49
OBRÁZEK 25 - FREKVENČNÍ SPEKTRUM RYCHLOSTI V PÁSMU 10HZ AŽ 800HZ VE VERTIKÁLNÍM SMĚRU NA LOŽISKU L5	50
OBRÁZEK 26 - FREKVENČNÍ SPEKTRUM ZRYCHLENÍ V PÁSMU 500 HZ AŽ 25600 HZ VE VERTIKÁLNÍM SMĚRU NA LOŽISKU L5	51
OBRÁZEK 27 - FREKVENČNÍ SPEKTRUM ZRYCHLENÍ V PÁSMU 500 HZ AŽ 25600 HZ V AXIÁLNÍM SMĚRU NA LOŽISKU L6	52
OBRÁZEK 28 – FREKVENČNÍ SPEKTRUM RYCHLOSTI V PÁSMU 10 HZ AŽ 800 HZ V AXIÁLNÍM SMĚRU NA LOŽISKU L8	53

SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ OBSAHU CHEMICKÝCH PRVKŮ RENTGENOVÝM SPEKTROMETREM.....	38
TABULKA 2 – ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT MAZIVA	39
TABULKA 3 – ŠTÍTKOVÉ HODNOTY ELEKTROMOTORU	41
TABULKA 4 – OTÁČKOVÉ FREKVENCE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTI SOUSTROJÍ.....	45
TABULKA 5 – MEZNÍ EFEKTIVNÍ HODNOTY RYCHLOSTI VIBRACÍ DLE ČSN ISO 10 816-3.....	47
TABULKA 6 – MEZNÍ EFEKTIVNÍ HODNOTY ZRYCHLENÍ VIBRACÍ DLE ČSN ISO 10 816-3.....	47
TABULKA 7 – NAMĚŘENÉ HODNOTY EFEKTIVNÍCH HODNOT RYCHLOSTI A VIBRACÍ	48

ÚVOD

Bakalářská práce se bude zabývat stavem turbokompresoru a celého jeho soustrojí, složené z elektromotoru, převodovky a turbokompresoru. Turbokompresor slouží k dopravě koksárenského plynu v koksárenském podniku Koksovna Svoboda.

Začátek práce bude věnován informacemi vzniku koksárenství na Ostravsku a procesy výroby koksu, vzniklé produkty a využití produktů z Koksozny Svoboda.

K vyhodnocení budou použity metody bezdemontážní technické diagnostiky, konkrétně tribodiagnostika a vibrodiagnostika. Vyhodnocením stavu se myslí provést požadované typy měření či zkoušek a vyhodnotit jejich výsledky. Tribodiagnostikou budou provedeny laboratorní zkoušky rozboru vzorku odebraného oleje z turbokompresoru. Bude se zjišťovat jak degradace turbínové oleje, kterým je mazán turbokompresor, tak technický stav samotného turbokompresoru. Pomocí vibrodiagnostiky budou hledány mechanické závady na celém soustrojí. Vibrace na celém soustrojí budou měřeny akcelerometrem, které se magneticky připevní a napojí na měřící zařízení Adash A44 00VA4 PRO.

Na závěr bude zhodnocený technický stav celého soustrojí na základě všech námi provedených diagnostických metod.

1. KOKSÁRENSTVÍ NA OSTRAVSKU

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [1].

1.1 OKK Koksovny, a.s.



Obrázek 1 – Koksovna svoboda [1]

1.2 Historie koksárenství na Ostravsku

První koksovna založena na Ostravsku byla založena v roce 1843. Rozvoj těžby koksárenského uhlí byl na vzestupu a vzápětí vzniklo na Ostravsku zhruba dvacet koksoven. Některé z nich neměly dlouhého trvání a po poměrně krátké době zanikly. V současné době je v provozu pouze koksovna Svoboda.

1.3 Koksovna Svoboda

V současné době je jediná aktivní koksovna na Ostravsku. Jejím vlastníkem je společnost OKK Koksovny, a.s., která je největším výrobcem slévárenského koksu v Evropě. Byla založena v roce 1908, tehdy pod názvem František. Přechodně měla názvy Generál Svoboda a Vítězný únor.

1.4 Program koksovny Svoboda

Hlavním cílem je produkce koksu, který tvoří jednu ze základních surovin pro výrobu železa, litiny a pro řadu dalších odvětví. Při výrobě koksu také vznikají vedlejší produkty – koksochemické výrobky.

1.5 Výroba koksu v koksovně Svoboda

Koksovna Svoboda k výrobě koksu využívá čtyři koksárenské baterie (číslo 7, 8, 9 a 10), která má 210 komor. První má 50 komor, druhá 54, třetí 50 a čtvrtá 56. Jejich kapacita je zhruba 15 +/- 5 tun koksu. Poslední baterie č. 10 byla uvedena do provozu v roce 2010.

Koks vzniká při termickém procesu zvaný pyrolýza černého uhlí za působení teploty zhruba 1150°C, bez přívodu vzduchu v koksovacích komorách. Spaluje se černé uhlí, na který je kladen požadavek vhodných vlastností pro termické zpracování a nízkého obsahu síry.

1.6 Proces výroby koksu v koksovně Svoboda

- **Manipulace s uhlím**

Patří zde operace, jako je vyložení uhlí, jeho vzorkování a skládkování v zásobnících

- **Příprava vsázky**

Vhodně vybrané druhy uhlí jsou vhodným poměrem smíchány do uhelné vsázky. Ta je vzápětí rozezlata a přemístěna do uhelných věží, kde je zhutněna do velkých uhelných hranolů pomocí pýchovacího stroje.

- **Vysokoteplotní karbonizace**

Následně pomocí sázecí desky je uhelný blok vsunut do komory koksárenské baterie. Zde je blok nepřímo zahříván na teplotu 1150 °C po dobu 32 až 34 h v topných stěnách za pomoci spalování technicky čistého koksárenského plynu bez přístupu vzduchu. Dochází zde ke karbonizaci uhelných hranolů a přeměně na koks. Ten je pomocí výtlačného stroje

vytlačen přes koš vodícího vozu na korbu hasícího vozu, který ho doveze pod chladicí věž vysokou 42 m, kde je pomocí spádu vody schlazen.

- **Manipulace s koksem**

Koks je hasícím vozem transportován na koksovou rampu, ze které je dávkován na pásový dopravník, který koks dopraví do hrubé třídírny koksu a poté slévárenský koks je naložen do nákladních vagónů a kontejnerů. Vysokopecní koks a technologické koksy po průchodu hrubé třídírny putují do jemné třídírny koksu, kde je pomocí vibračních třídičů rozdělen na požadované zrnitosti. Třídírna třídí koks na čtyři druhy: prach, hrášek, ořech a kostky. Roztříděný koks je vysypán do nákladních vagónů nebo kontejnerů a dopraven k zákazníkům.

- **Chlazení a čištění surového koksárenského plynu a získávání vedlejších chemických produktů**

Při procesu koksování se zachytává surový koksárenský plyn a při jeho chemickém čištění jsou oddělovány chemické výrobky. Mezi koksochemické výrobky patří surový dehet, surový benzol, síran amonný, síra a samotný koksárenský plyn.



Obrázek 2 – Vizualizace výroby koksu [1]

1.7 Produkty výroby koksu v koksovně Svoboda

Koksovna produkuje tři základní druhy koksu, které se liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi:

- **Slévárenský koks**

Musí mít vhodné technologické vlastnosti pro výrobu izolačních materiálů a litiny na základě čediče nebo skelných vláken.

- **Vysokopecní koks**

Ve vysoké peci tvoří nosnou strukturu a funguje jako oxidačně-redukční činidlo. To při výrobě surového železa zabraňuje zpětnému proudění plynů a tekutých produktů vysokopecního pochodu. Rozdíl mezi slévárenským koksem a vysokopecním koksem je v pevnosti, hutnosti, kusovosti a reaktivitě.

- **Technologický koks**

Je využíván jako levné a ekologické palivo. Kvůli jeho nízkého obsahu balastu a síry v poměru k výhřevnosti splňuje přísné emisní limity. Nejjemnější zrnitost o velikosti 10-20 mm se používá v hutnictví při výrobě aglomerátu, jako nahličovadlo v ocelářství, pro kovářské účely, nebo jako sorbet. Větší zrnitost slouží pro ohřev vody a výrobu tepla, např. v domácnostech či firmách.

2. RYCHLOSTNÍ KOMPRESORY

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [2], [3], [4], [5].

Kompresory slouží k zvýšení tlaku plynu nebo plynné směsi. Zvýšením tlaku lze také docílit překonání ztrát v potrubních systémech a třecích sil. Oproti objemovým kompresorům, u kterých dochází ke zvýšení tlaku za pomoci zmenšení objemu pracovního prostoru, rychlostní kompresory využívají ke zvýšení tlaku zrychlení proudícího plynu a následnou přeměnu kinetické energie plynu v tlakovou energii.

Rychlostní kompresory dělíme na turbokompresory radiální (odstředivé), turbokompresory axiální (osové), a ejektory.

2.1 Turbokompresory

Mechanismus turbokompresoru se skládá z turbíny a kompresoru.

Výhody oproti pístovým kompresorům:

- Klidný chod kvůli absenci součástí, které konají vratný pohyb.
- Poměrně nízká hmotnost.
- Jednodušší údržba, protože neobsahuje součásti náchylné k poruchám.
- Bez maznosti, protože mazivo nepřichází do styku s plynem.
- Dlouhá životnost.
- Vysoká spolehlivost provozu.

Nevýhody oproti pístovým kompresorům:

- Míra stlačení plynu je závislá na jeho fyzikálních vlastnostech.
- Vysoká hladina hluku.
- Vysoké otáčky, čímž bývá většinou nutná převodovka.
- Citlivost na změnu tlaku, hrozí nebezpečí pumpování.
- Potřeba většího počtu oběžných kol pro dosažení větších tlaků.

2.2 Radiální turbokompresory

Nasávaný plyn proudí do oběžného kola v axiálním směru, který se následně v oběžném kole změnil na radiální. Obvodová rychlost turbokompresoru bývá od 110 až 380 m·s⁻¹, u leteckých 350 až 450 m·s⁻¹. Je závislá na kritické rychlosti plynu a dovoleného namáhání oběžného kola. Plyn je stlačen při dostatečně velké obvodové rychlosti obvodového kola odstředivou silou. Po výstupu z oběžného kola je plyn v difuzoru zpomalen a jeho tlak navýšen. Částečně stlačený plyn je po výstupu z difuzoru prvního stupně

převezený vratným kanálkem do sání druhého stupně. Na přední i zadní straně oběžných kol je labyrintová ucpávka kvůli snížení ztrát netěsností.

Poměrné stlačení v jednom stupni je u klasických radiálních turbokompresorů maximálně $\pi = 2,5$. Většího stlačení docílíme zařazením oběžných kol za sebou.

2.3 Axiální turbokompresory

Jejich realizace stojí na základech vytvořit kompresor ke stlačování vzduchu pro spalovací turbíny, u kterých je potřeba vyšší energetické účinnosti. Oproti radiálním turbokompresorům jsou delší, kvůli většímu počtu stupňů, ale lehčí.

Výkonnost se pohybuje od 10 000 až 2,5·10⁶ m³·h⁻¹, maximální tlak až 1,5 MPa a otáčky 3 000 až 20 000 ot·min⁻¹, obvodová rychlost oběžných lopatek je volena do 260 m·s⁻¹. Poměrně nízký tlakový poměr v jednom stupni je zapříčiněn absencí působení odstředivých sil.

Plyn je nasáván hrdlem do sací komory, následně je usměrněn lopatkami předřadného statoru, poté urychlován oběžnými lopatkami jednotlivých kol rotoru. K zvýšení tlaku dojde v předváděcích lopatkách statoru a pokračuje do dalšího stupně. Z difuzoru za posledním stupněm proudí do výtlačného hrdla stlačený plyn. Rotor je uložen v ložiskách.

2.4 Závady na kompresorech

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [6].

2.4.1 Lopatková frekvence ve spektru vibrací

Na lopatkových strojích je lopatková frekvence běžným projevem ve spektru vibrací. Projevují se na frekvenci násobku otáčkové frekvence rotoru a počtem rovnoměrně rozmístěných rotujících lopatek.

Při poškození lopatek, nerovnoměrném rozmístění média po obvodu lopatkového kola a při velké proměnné lopatkové vůli podél obvodu statoru kvůli excentricity roste amplituda signálu vibrací na lopatkové frekvenci a jejich násobcích.

2.4.2 Přidírání na ucpávkách

Při této závadě dochází k snížení těsnosti ucpávek. Příčinou může být nevhodné provedení ucpávek, uvolnění hřídele v ložiscích, nevývaha, nebo chybná montáž.

Může dojít k částečnému nebo úplnému kruhovému přidírání.

2.4.3 Nestabilita rotoru v kluzných ložiskách

Nestabilita může nastat nejenom v ložiskách, ale také na ucpávkách. Důsledkem bývají dvě fáze nestability. Těmi jsou whirl a whip, neboli víření a tlučení oleje.

První fázi, víření oleje způsobená malou excentricitou hřídele v ložisku a malou tuhostí olejového filmu vytváří obvodové proudění a olejový klín, který rotuje na obvodu ložiska. Druhá fáze, tlučení oleje, nastává při zvyšování otáček po překročení prahu stability.

2.4.4 Příčná trhlina v rotoru

Nastává při nepřijatelném radiálním zatížení rotoru, nebo např. při poškození korozí. Dochází k ní při konstrukčních, výrobních, nebo materiálních vadách.

2.4.5 Uvolnění základů, uvolnění ložiska, a nadměrná vůle kluzného ložiska

Uvolnění mezi ložiskovým stojanem a základem je typická závada, která projevuje se ve všech třech směrech měření. Uvolnění základů se projevuje zvýšenou amplitudou na otáčkové frekvenci stroje. Velké vůle kluzného ložiska jsou způsobeny opotřebením nebo nepřesnou výrobou.

2.4.6 Turbulence a pompáž ve spektru vibrací

K pompáži dochází, když se pracovní bod (u kompresoru je pracovní bod návrhové množství protékaného a stlačovaného) vzdaluje navrhnutému stavu. Nastává snížení rychlosti proudícího média do stroje, to se projevuje zmenšením množství plynu na sání, proudění se odtrhne na lopatkách a tlak se šíří zpátky do sání. Projevuje se v jednotkách Hz.

3. TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [5], [7], [8].

Je samostatný obor, který se zabývá bezdemontážním a nedestruktivním zjištěním technického stavu požadovaného objektu. Sledováním technického stavu objektu, detekováním fyzikálních a chemických změn procesů zjistíme jeho spolehlivost, což je jeden ze základních znaků jakosti technického zařízení.

Mezi činnosti technické diagnostiky patří preventivnost (provedení v pravý čas), prediktivita (odhad budoucího stavu objektu) a proaktivita (aktivní předcházení poruše).

Cíle technické diagnostiky jsou:

- Prodloužení životnosti objektu.
- Včas předpovídat poruchy.
- Zvýšení spolehlivosti (minimalizovat počet havarijních výpadků provozu).
- Snížit ztráty energie (tření, teplo, vibrace atd.).
- Minimalizace nákladů na servis a zbytečné měnění dílů.

4. VIBRODIAGNOSTIKA

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [6], [7], [8].

Vibrodiagnostika je odvětví technické diagnostiky, které sleduje vibrace rotujících strojů. Je nedílnou součástí provozu každého rotujícího stroje, kde je potřeba zajistit maximální efektivitu, produktivitu a bezpečnost provozu. Slouží jako nástroj ke zjištění technického stavu stroje a jeho opotřebení.

Mezi její hlavní úlohy patří detekce, neboli odhalení existence vznikající nebo již vzniklé poruchy a lokalizace, tedy určení místa vzniku poruchy. Mezi její další úlohu patří prognóza, což je předpověď budoucnosti technického stavu stroje, za účelem zjištění času do nutné opravy nebo životnosti stroje na základě dosavadního vývoje vibrací.

Vibrace mohou být způsobeny dynamickým namáháním stroje, nevývahou, nesouosostí, technickým stavem ložisek, hřídelí, převodovek, vůlemi pohyblivých součástí, stykem třecích ploch, rázy atd.

4.1 Snímače vibrací

Hlavním požadavkem na výstupní signál snímače je co nejpřesněji napodobit průběh mechanického kmitání stroje. K přesnému zaznamenání vibrací je potřeba použít vhodný snímač.

4.1.1 Akcelerometry

V dnešní době jsou nejrozšířenějším typem snímačů. Jedná se o seismické zařízení, které se montuje na nerotující část konstrukce stroje. Vibrační zrychlení měřeného stroje generuje jemu úměrný výstupní signál, který je v námi požadované veličině, jako například rychlost, zrychlení, nebo výchylka vibrací.

Na snímači je jeden nebo více piezokrystalů, které vytváří elektrický náboj úměrný působící síle.



Obrázek 3 – Tlakový akcelerometr [12]

4.1.2 Bezdotyková sonda

Je snímač relativní výchylky, který měří výchylku střední polohy mezi rotující a nerotující částí stroje. Vhodný je zejména pro velké rotující stroje, jako jsou turbínové stroje, kde snímač bezdotykově naměří relativní výchylku mezi rotorem a statorovou konstrukcí.

Funguje na principu vířivých proudů, které vznikají z vysokofrekvenčního magnetického pole, za pomoci cívky v sondě, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud. Za pomoci této konstrukce, elektrický vodivý materiál v tomto poli, jako je například hřídel, generuje vířivé proudy.

4.1.3 Snímač rychlosti

Je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný působícím rychlosti vibrací na měřeném tělese. Obsahuje cívku, která indukuje elektrický proud a napětí pomocí pohybujícímu se magnetu uvnitř cívky. V dnešní době jsou používány nanejvýše ve starých provozech. Jejich použití nahradili akcelerometry, které jsou menší, lehčí a levnější.

4.2 Rozdělení signálu

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [7].

Signálem jsou myšleny funkce, které představují časové průběhy fyzikálních veličin a dávají nám informace o objektu vybuzující daný signál.

Základní rozdělení signálů:

4.2.1 Deterministický signál

Jeho časový vývoj náleží určitému funkčnímu předpisu. Dělí se na 4 typy:

- **Periodický signál:**

Jeho frekvence jsou tvořeny celistvými násobky jedné základní frekvence.

- **Kvaziperiodický signál:**

Signál je složen harmonickými signály, jejichž frekvence jsou násobky minimálně dvou základních frekvencí a zároveň jsou v poměru, který je určený iracionálním číslem.

- **Přechodový signál:**

Časově omezený signál, odezva na náhlé vybuzení.

4.2.2 Náhodný (sochastický) signál

- **Stacionární signál:**

Ustálený signál, který se v čase nemění.

- **Nestacionární signál:**

Signál, jehož vlastnosti se v čase mění.

4.3 Měřené veličiny

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [6], [7].

4.3.1 Frekvence kmitání

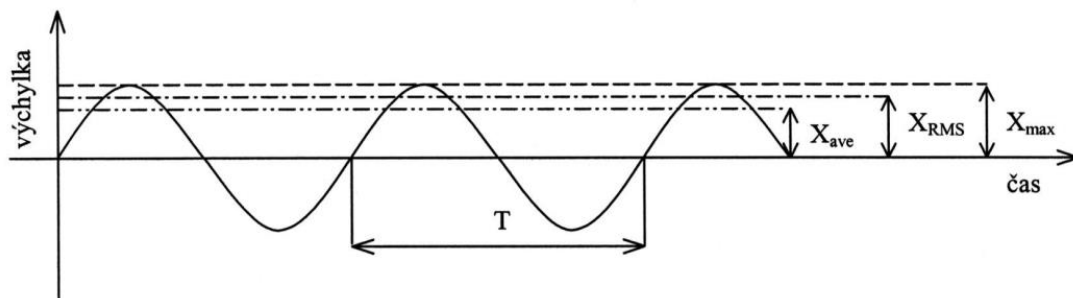
$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4.1)$$

Kde jsou:

T – čas;

ω - úhlová rychlost.

4.3.2 Okamžitá výchylka



Obrázek 4 – Okamžitá výchylka vibrací [6]

$$x = x_{max} * \sin(2\pi \frac{t}{T}) = x_{max} * \sin(2\pi * f * t) = x_{max} * \sin \omega t \quad (4.2)$$

Kde jsou:

x_{max} – amplituda výchylky;

t – úhlový kmitočet;

T – čas;

ωt – úhlový kmitočet;

$\omega = 2\pi f$ – kruhová frekvence.

Výchylka x [m] je změna vzdálenosti nebo polohy objektu od referenční polohy. Jedná se o harmonické kmitání, které je vybuze no pravidelným, vychýlením částice z klidové polohy. Okamžité hodnoty výchylky vytváří v časovém průběhu funkci sinus.

4.3.3 Rychlost

Lze definovat jako rychlost změny výchylky vibračního signálu. Klasickým měřicím zařízením je snímač rychlosti, ovšem kvůli svým nevýhodám je v dnešní době nejčastěji rychlost měřena akcelerometrem. Ten získá rychlost integrací hodnoty zrychlení. Rychlost je dána velikostí a směrem. Pro okamžitou rychlost platí následující vztahy:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega * x_{max} * \cos(\omega t) = v_{max} * \cos(\omega t) = v_{max} * \sin(\omega t) \quad (4.3)$$

Kde jsou:

a – zrychlení;

v_{max} – maximální rychlost.

4.3.4 Zrychlení

Okamžité zrychlení je změna rychlosti. Je odvozené od druhé derivace okamžité výchylky podle času. Měří se stejným zařízením jako měření rychlosti vibrací, tedy akcelerometrem. Zrychlení je dáno velikostí a směrem. Pro zrychlení platí následující vztahy:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot x_{max} \cdot \sin(\omega t) = -a_{max} \cdot \sin(\omega t) = a_{max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad (4.4)$$

Kde jsou:

a – zrychlení v $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

v – rychlost v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

ω – úhlový kmitočet.

4.4 Metody vyhodnocení vibrací

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [6], [7].

4.4.1 Fourierova transformace

Je metoda na základě integrální transformaci signálu. Používá se v případě, kdy nelze detekovat nebo lokalizovat poruchu přímo z naměřeného signálu, neboli analýzou signálu v časové oblasti. Rozkládá signál na soubor harmonických funkcí, které mají odlišnou

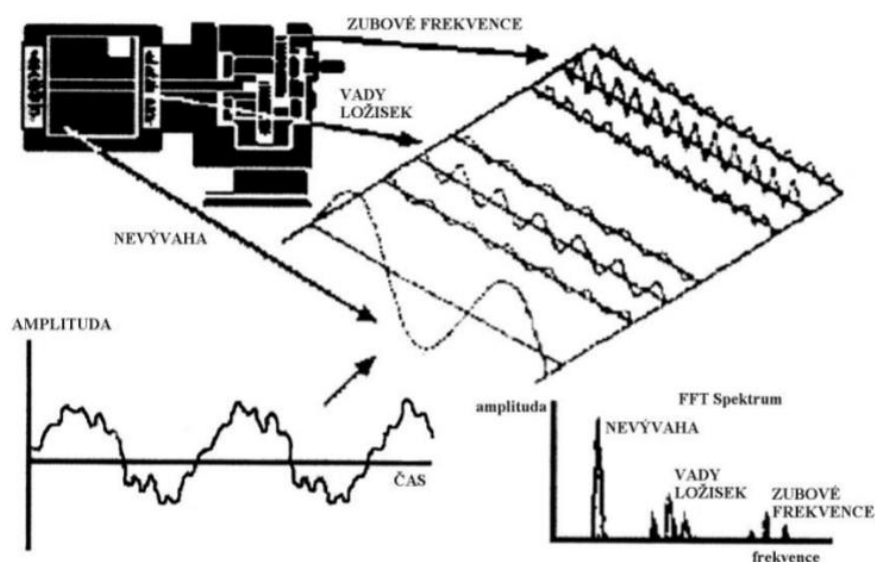
amplitudu, úhlovou frekvenci a počáteční fázi. Spektrum poté obsahuje jednotlivé oddělené frekvenční složky, které jsou násobky základní a harmonické frekvence.

Neperiodické funkce jsou řešeny rychlou Fourierovou transformací, neboli Fast Fourier Transformation (FFT).

4.4.2 FFT frekvenční analýza

Je nejpoužívatelnější analytická metoda, která zobrazuje ve frekvenčním spektru periodické děje, nalezené z průběhu vibračního signálu. U periodicky opakovatelných dějů je frekvenční rozklad ve formě sinusových signálů s určitou počáteční fází a amplitudou.

Oproti klasického naměřeného časového záznamu, je pomocí této metody jednodušší zjistit o jakou závadu na stroji se jedná. Například nevývaha se nachází při nižších frekvencích, protože za jednu otáčku hřídele způsobí jednu vibrační harmonickou periodu. Její amplituda je dominantní na otáčkové frekvenci. Vady ložisek a zubové frekvence mají nižší amplitudu a nacházejí se na vyšších frekvencích, protože za jednu otáčku hřídele přejde hodně valivých elementů a způsobí tím více vibračních dějů. Toto vše je znázorněné na obrázku X.



Obrázek 5 – Skládání a zobrazení vibrací ve frekvenčním spektru [6]

Její předností je rychlost, přesnost, srozumitelné nastavení parametrů a realizovatelnost ve formě univerzálního elektronického obvodu.

Frekvenční analyzátor vibrací je zařízení pro monitorování stavu vibrací. Zachycuje a následně analyzuje naměřené hodnoty, které zpracovává do grafů a tabulek.

4.5 Sledování trendu vibrací

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [7].

Při pravidelném měření stavu vibrací daného zařízení, lze poměrně přesně predikovat jeho zbytkovou životnost. Naměřená hodnota se pokaždé srovná s předchozí naměřenou hodnotou a kritickou mezí. Když každé měření postupně vyneseme do grafu, kde osa X bude udávat dobu provozování stroje a osa Y naměřenou požadovanou veličinu (např. velikost vibrací), tak získáme vanovou křivku, pomocí které zbytkovou životnost dokážeme odhadnout. Je důležité, aby každé měření bylo měřeno při stejných provozních podmínkách.

Vanová křivka se skládá ze tří fází:

1. Záběhová fáze

Fáze, při které u nového stroje dochází k zaběhnutí jednotlivých součástí. Na začátku provozu jsou lehce zvýšené vibrace, které se po čase zmenší na optimální hodnotu.

2. Provozní fáze

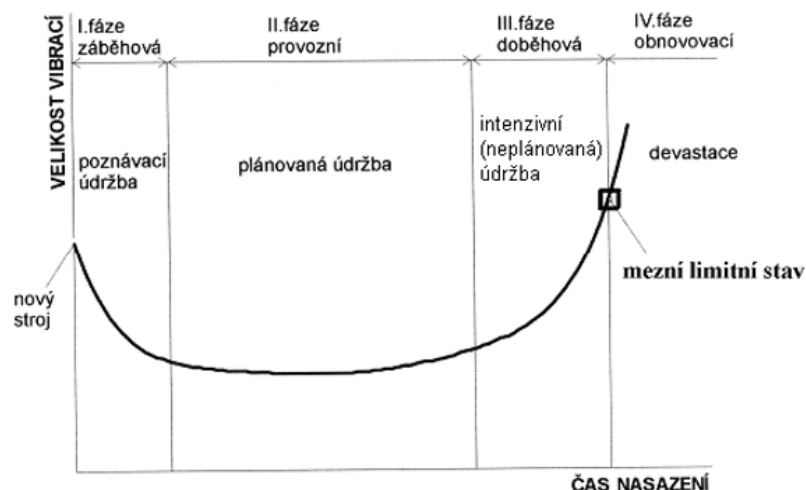
Stroj v této fázi je v ideálním provozuschopném stavu, vibrace jsou v optimálních hodnotách.

3. Doběhová fáze

Stroj vykazuje známky zvýšených vibrací, dochází k opotřebení součástí. Zvýšené hodnoty vibrací a vývoj vanové křivky upozorňuje na výskyt vznikající poruchy, nebo opotřebované součásti. Je potřeba diagnostikovat, o jakou poruchu se jedná a provést následnou opravu.

4. Obnovovací fáze

Hodnoty vibrací v této fázi jsou na limitním stavu, při neprovedení údržby stroje může dojít k havárii stroje.



Obrázek 6 – Průběh vibrací v závislosti na čase (Vanová křivka) [6]

4.6 Údržba stroje

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [7].

Tvoří nepostradatelnou část technické diagnostiky stroje. Poskytuje objektivní obraz o sledovaném objektu a zlepšuje jeho efektivitu.

Je možno ji aplikovat třemi různými způsoby:

4.6.1 Údržba na základě skutečného stavu objektu:

Jedná se o nejlepší možnou metodu, která je založena na monitorování technického stavu objektu.

4.6.2 Údržba na základě časového plánu:

Údržba je prováděna ve stanovených časových intervalech, kdy může dojít k předčasné, nebo naopak opožděné opravě. Navíc také ke zhoršení stavu objektu dochází v některých případech při jeho demontáži a montáži, přičemž ke zjištění zhoršeného stavu objektu může dojít pozdě.

4.6.3 Údržba po poruše objektu

Při poruše stroje je potřeba přerušit jeho provoz a dochází k výpadku technologického procesu. Porušená část stroje může způsobit poškození dalších částí strojů a narušit bezpečnost provozu.

5. TRIBODIAGNOSTIKA

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [9], [10].

Je obor technické diagnostiky, který pomocí maziva, které je ve stroji aplikováno, získává informace jak o technickém stavu stroje, tak o degradaci samotného maziva.

Mazivo je aplikováno mezi třecí dvojicí, za primárním účelem oddělení této dvojice a minimalizaci tření mezi ní.

Vhodně zvolené mazání pohyblivých částí je nezbytné pro správný chod strojů. Nesprávnou aplikací tribologických zásad, (tribologie je věda zabývající se chováním třecí dvojicí), jsou ztráty vyrobené energie přibližně 30 % a 80-90 % strojů je vyřazeno z provozu z důvodu škod poškození z opotřebení tenkých povrchových vrstev.

Dalšími pozitivními přínosy tribotechniky je snížení nákladů na údržbu, zvýšení produkční schopnosti a provozní životnosti strojů, snížení spotřebované energie, zmenšení opotřebení materiálu a nárůst výkonnosti strojní výroby. Stav namáhaných strojů je určován třením a opotřebením.

Mezi následky opotřebení patří:

- Změna tvaru, velikosti a vzhledu namáhané součásti.
- Změna krystalické struktury ploch třecích členů.
- Změna provozních podmínek, např.: teplota a výkon tření.
- Změna fyzikálních a chemických vlastností maziva.

5.1 Zjišťování technického stavu stroje pomocí maziva

Technický stav stroje zjišťujeme stanovením obsahu otěrových kovů v mazivu. Namáhaná třecí dvojice se postupem času opotřebovává a proudící olej mezi touto dvojicí strhává stopové částice kovů. Tyto částice zůstávají v oleji a odborným zjištěním jejich množství, velikosti a tvaru, získáme informaci o technickém stavu stroje, typu jeho opotřebení, nebo o vzniku poruchy na stroji, kde pomocí vlastností otěrových částic jsme schopni zjistit i přesné místo závady.

Mezi metody ke zjištění technického stavu stroje patří:

- Atomová spektrofotometrie:
Dělí se na atomovou emisní a absorpční spektrofotometrii
- Polarografie a voltametrie
- Metoda RAMO
- Částicová analýza (ferografie s vyhodnocením):
Hodnotí morfologii a distribuční rozdělení částic kovů.

5.2 Zjišťování degradace maziva

Zjišťováním parametrů samotného maziva získáme informace o jeho životnosti. Parametry mohou být negativně ovlivněny stopovými částicemi z opotřebovávané třecí dvojice, což způsobuje zhoršení kvality mazání. Degradace maziva také způsobují tepelně-oxidační procesy, nebo vnější nečistoty.

Mezi metody ke zjištění degradace maziva patří:

- Kinematická viskozita.
- Obsah vody.
- Číslo celkové alkality a kyselosti.
- Bod vzplanutí.
- Celkové znečištění.
- Kapková zkouška.
- Mechanické nečistoty.
- Spektrální analýza olejů.

5.3 Odběr vzorku oleje

Aby byl vzorek co nejvíce reprezentativní (obsahoval průměrné složení maziva v zařízení), je potřeba dodržet zásady pro odběr vzorku. Stroj by měl být zaběhnutý, minimálně 20 minut v provozu, aby byl olej promíchaný a zahřátý na provozní teplotu. Odběrové místo je potřeba před odebráním vzorku propláchnout, postačí odpustit minimálně 500ml oleje do čisté nádoby, který se následně nalije zpět do zařízení. Po propláchnutí odebereme vzorek oleje do čisté vzorkovnice o množství obsahu 300 ml. Na vzorku musí být napsány informace o názvu stroje, mazaném místě, druhu maziva, datu odběru a osobě, která vzorek odebrala a jaké rozboru je potřeba provést. Nejideálnější je, když z daného stroje vzorek odebírá jeden a ten stejný diagnostik, z důvodu nejpresnější reprezentace vzorku pro sledování průběhu složení oleje při odběrech provedených v časových intervalech.

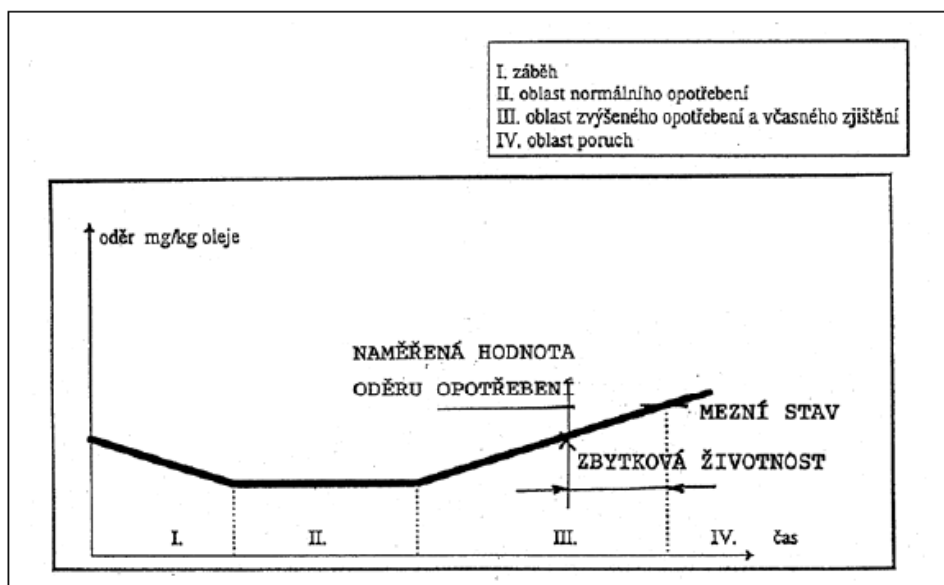


Obrázek 7 – Odběr oleje turbokompresoru v Koksovně Svoboda

5.4 Trend stavu oleje

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [9].

Při pravidelném odebrání a provádění rozborů vzorků oleje získáváme trend oleje, což je kvalita oleje v závislosti na čase. Zpravidla u maziva, tak stejně jako při vibrodiagnostice strojů, při vynesení naměřených hodnot (jako je např.: počet a velikost otěrových částic v závislosti na čase na obrázku X) do grafu získáme vanovou křivku o čtyřech oblastí.

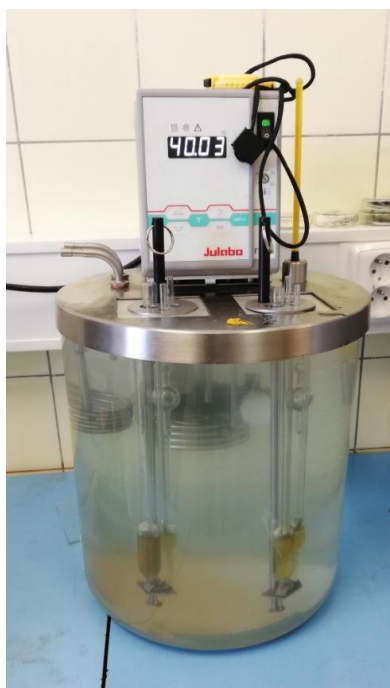


Obrázek 8 – Vanová křivka maziva degradovaného vlivem opotřebení [9]

6. LABORATORNÍ ZKOUŠKA VZORKU OLEJE

6.1 Viskozita

Pečlivě protřepaný homogenizovaný vzorek byl vložen do viskozimetru, kde byl zahříván 30 minut na požadovanou teplotu. Poté jsme injekční stříkačkou vzorek vytlačili do požadované výšky trubice, abychom mohli začít měřit čas průtoku oleje přes vyznačené rysky. Stopkami jsme změřili čas 451 s. Podle dokumentace je konstanta viskozimetru 0,0998, což při vynásobení změřeného času dává výsledek viskozity $45,01 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota je vyhovující.



Obrázek 9 – Měření viskozity kapilárním viskozimetrem

6.2 Obsah vody

Zkouška byla provedena Coulometrickou metodou. Homogenizovaný vzorek nabraný injekční stříkačkou jsme zvážili, váhu vynulovali a následně vpravili do destilační pícky zapnutého přístroje se zkompenzovanou náplní. Prázdnou injekční stříkačku znovu zvážíme a údaj na váze nám udává hmotnost oleje vstříknutého do destilační pícky. Naměřená hmotnost byla 5,3056 g. Hodnotu zapíšeme do přístroje a ten následně vyhodnotí procentuální obsah vody v oleji.

Metoda spočívá na principu uvolňování jódu, který se uvolňuje v tiratační nádobce za průchodu elektrického proudu. Jeden mol vody reaguje s jedním molem jódu. Po zreagování veškeré vody jódem, je určen nadbytek jódu v nádobce.

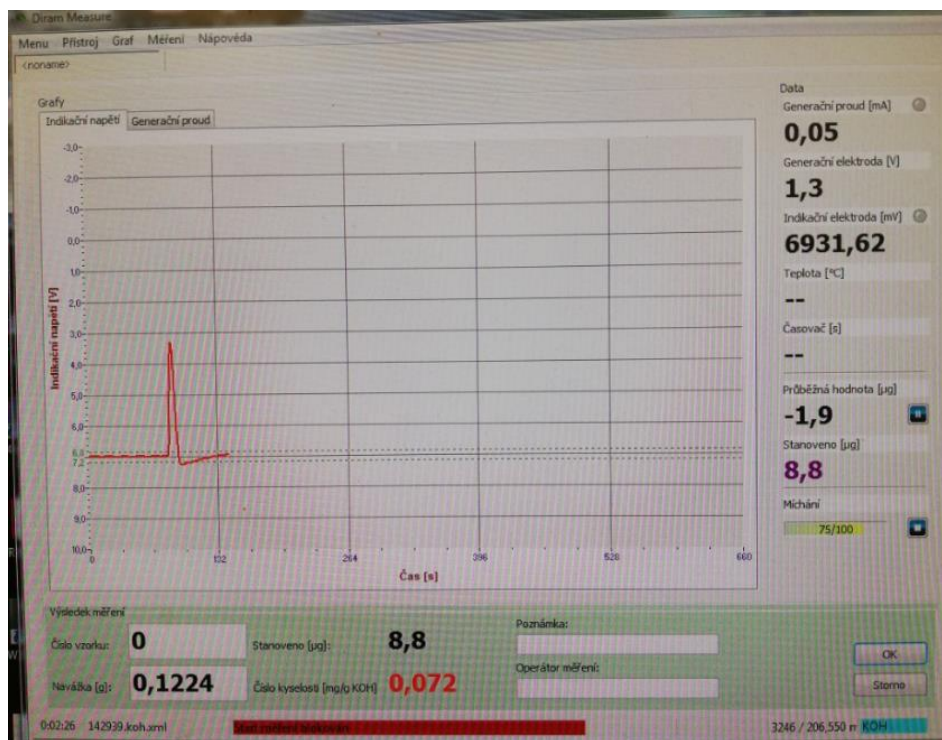
Výsledek našeho vzorku je 0,0007% vody, což splňuje požadavek maximálního obsahu vody v oleji.



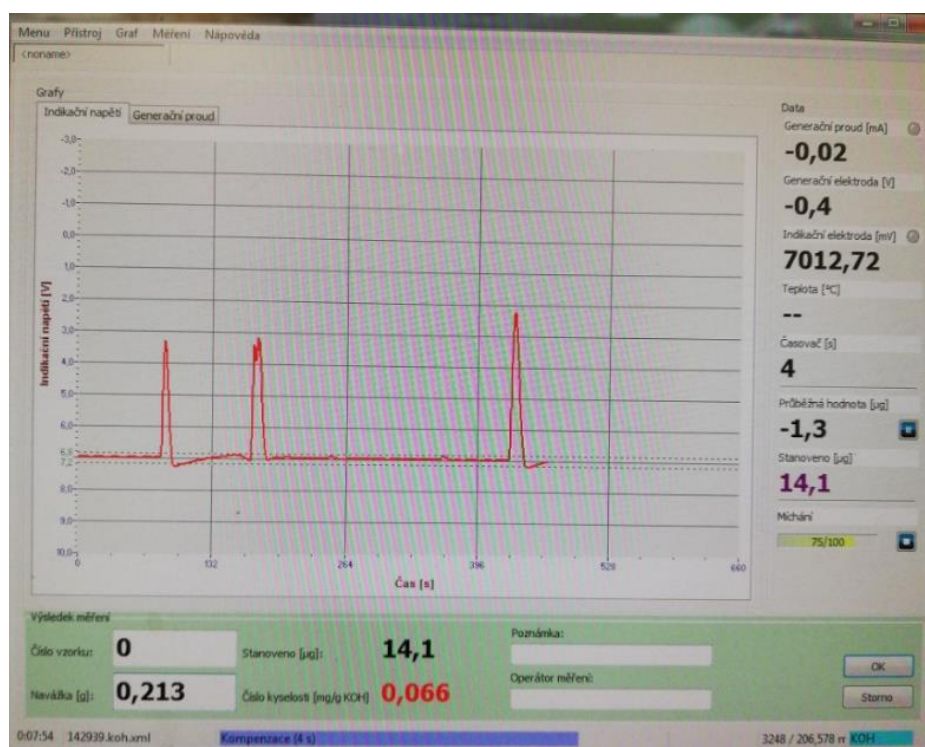
Obrázek 10 – Měření obsahu vody Coulometrem

6.3 Kyselost

Zkoušku byla provedena celkem dvakrát pro lepší přesnost výsledku. Injekční stříkačkou jsme nabrali homogenizovaný vzorek a zvážili na laboratorní váze, kterou jsme poté vynulovali. Vzorek jsme vstříkli do Coulometru pro stanovení čísla kyselosti. Prázdnou stříkačku jsme znovu zvážili a hodnotu zobrazenou na váze jsme napsali do softwaru v počítači, se kterým je Coulometr propojený. Při prvním měření hmotnost vzorku byla 0,1224 g, při druhém 0,213 g. Přístroj se softwarem vyhodnotil množství KOH v miligramech, potřebné pro zneutralizování kyselých složek obsažených v jednom gramu oleje. První měření vyšlo 0,072 mg/g KOH a druhé 0,066 mg/g KOH.



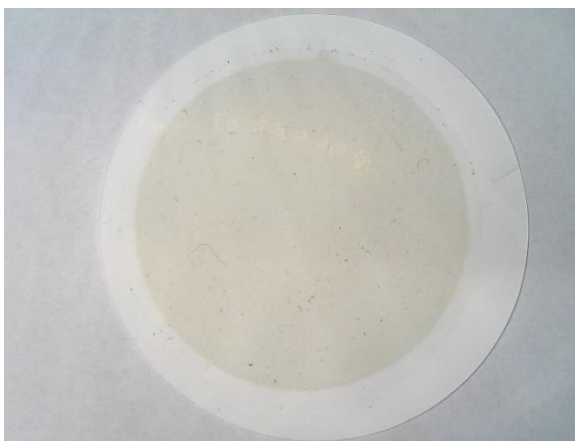
Obrázek 11 – Softwarové vyhodnocení prvního pokusu zkoušky kyselosti



Obrázek 12 – Softwarové vyhodnocení druhého pokusu zkoušky kyselosti

6.4 Celkové znečištění

Zkouška celkového znečištění byla provedena podle ČSN ISO 4406/99. Podstata metody je filtrace vzorku při podtlaku membránovým ultrafiltrem. Následně pomocí mikroskopu je softwarově spočítán počet nečistot, rozdělených do tří skupin. Výsledek vyjde v kódu čistoty, kde první číslo je počet částic větších než 4 μm včetně, druhé větších a rovno 6 μm a třetí udává částice větší a rovno 14 μm . Norma obsahuje tabulku, která k výsledným číslům přiřazuje počet daných nečistot. Daný vzorek má kód čistoty 17/16/14. Obsahoval poměrně hodně nečistot větších než 14 μm , což je opodstatněné tím, v jakém prašném prostředí se stroj nachází. Tyto nečistoty se do oleje mohli dostat špatným těsněním stroje. Vzorek i přes to splňuje požadavek na celkovou čistotu oleje.



Obrázek 13 – Membránový ultrafiltr po profiltrování vzorku



Obrázek 14 – Ukázka jedné z nalezených velkých částic pod mikroskopem

6.5 Rentgenová spektrometrie

Zkouška byla provedena pomocí přístroje SPECTRO XEPOS 3, což je univerzální energodisperzní rentgenový spektrometr se zvýšenou citlivostí a rozsahem prvků. Tento přístroj dokáže zanalyzovat obsah chemických prvků od sodíku až po uran.

Do přístroje jsme vložili náš vzorek, a během krátké doby byl vyhodnocen obsah chemických prvků a softwarově zobrazen na počítači. Výpis udává jejich obsah v jednotce ppm (z latinského parts per milion, neboli jedna miliontina z celku). Na Obr. X jsou tabulkově zpracovány důležité sledované prvky v našem vzorku, které vyhovují požadovaným parametrům.



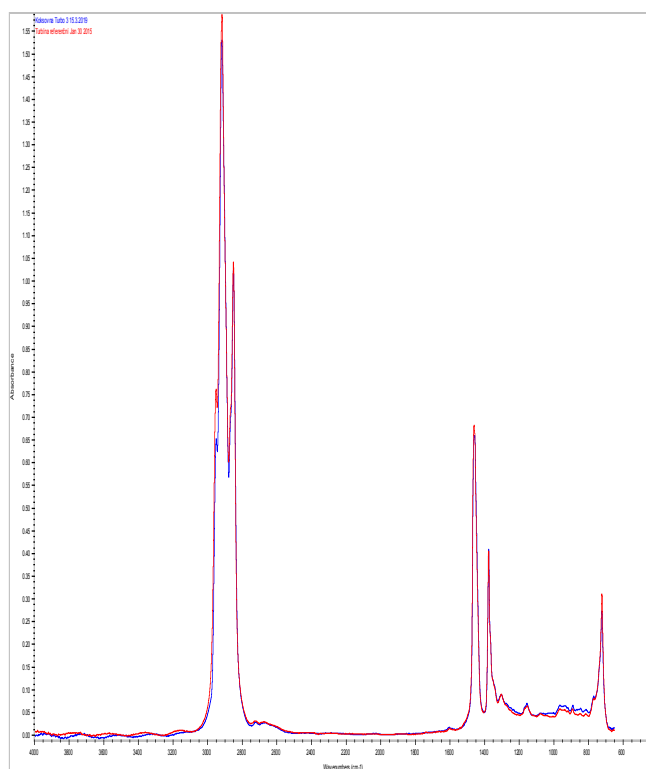
Obrázek 15 – Zkouška rentgenové spektrometrie

Tabulka 1 – Výsledky měření obsahu chemických prvků rentgenovým spektrometrem

Prvková analýza ED-XRF				výstr.	max.	hodnota
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika		10	30	<1
obsah Cu				15	25	4
obsah Cr				12,5	15	6,5
obsah Sn				10	30	<3
obsah Si					30	<1
Aditiva, degradace				MOGUL TB 46		hodnota
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika		15,1		367,9
obsah P				-		14,8
obsah Na				3477		5384
obsah Mg				-		<101
obsah Zn				-		4,5
obsah Ca				-		<10

6.6 Infračervená spektrometrie

Zkouška byla provedena pomocí přístroje pro spektrální analýzu olejů FTIR spektrometr Nicolet – Impact 410. Funguje na principu infračervené spektrometrie, která analyzuje absorpční spektra molekul, které absorbují záření o určitých vlnových délkách. Pomocí této zkoušky je zjistitelná degradace oleje a úbytek aditiv, nebo také množství sazí a karbonu. Přístroj nám výsledek zkoušky zobrazí v grafu, viz obr. X. Ukazuje porovnání referenčního vzorku oleje s našim odebraným vzorkem. Hodnoty dosahují minimálních odchylek, takže lze usoudit, že olej je v optimálním stavu.



Obrázek 16 – Grafové vyhodnocení zkoušky pomocí infračervené spektrometrie

Tabulka 2 – Zpracování naměřených hodnot maziva

Parametr kvality	Rozměr	Metoda	Požadov. hodnota			Stanovená hodnota
			min.	výstr.	max.	
Kinematická viskozita při 40°C	mm ² /s	ČSN EN ISO 3104	41,4		50,6	45,01
TAN (Č. kyselosti)	mgKOH/g	ČSN ISO 6618		0,3	0,5	0,069
Obsah vody	hm. %	ČSN EN ISO 12937		0,05	0,1	0,0007
Mechanické nečistoty	mg/100cm ³	ČSN 65 6220		20	50	
Kód čistoty	třída	ČSN ISO 4406/99		19/18/15		17/16/14
Kód čistoty	třída	NAS1638				9

7. VIBRODIAGNOSTIKA MĚŘENÉHO ZAŘÍZENÍ

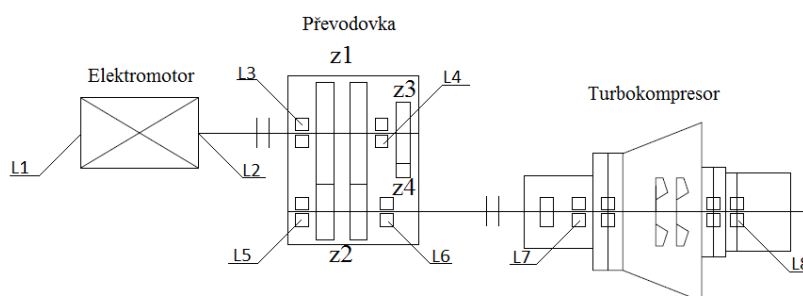
Sledování stavu stroje za provozu je jedna z nejdůležitější činností ve výrobním procesu. Monitorování a vyhodnocení jsou jedny ze základních metod provozní diagnostiky. Vibrodiagnostika poskytuje kvalitní informace o jednotlivých vnitřních stavech dílů a údaje o místě poruchy

Měření bylo provedeno na všech potřebných místech pro provedení kompletní a důkladné vibrodiagnostiky stroje pro dopravu koksárenského plynu.

7.1 Popis měřeného zařízení



Obrázek 17 – Měřené soustrojí



Obrázek 21 – Schéma měřeného soustrojí

Zdroj: Interní materiály VŠB-TUO

Stroj se skládá z asynchronního elektromotoru, zubové spojky mezi elektromotorem a převodovkou, zubové spojky mezi převodovkou a turbokompresorem, samotným turbokompresorem a mazacím systémem pod ním.

Motor

Stroj pohání třífázový asynchronní elektromotor od firmy ABB.

Tabulka 3 – Štítkové hodnoty elektromotoru

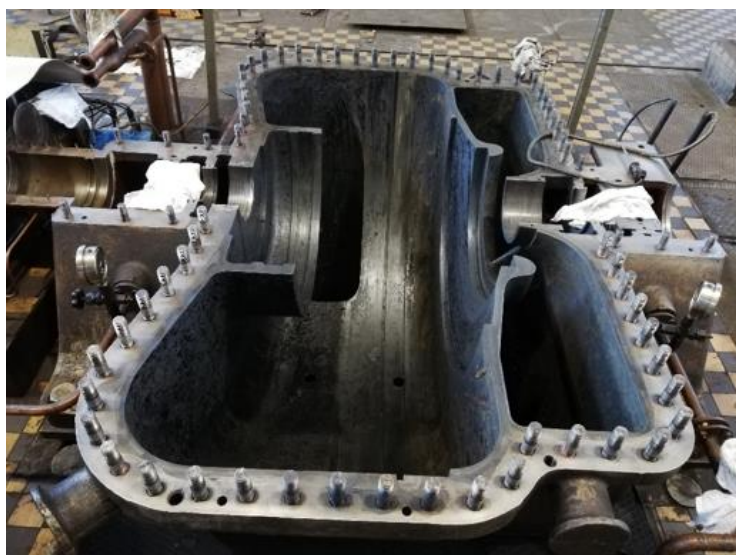
Výrobce	Typ	Rok výroby	Výkon	Otáčky	Hmotnost
ABB	AMD 560 L4T BABM	2011	725 kW	1480 ot·min ⁻¹	5900 kg

Převodovka

Zvětšuje velikost otáček z elektromotoru na hřídel turbokompresoru a přenáší na ní výkon. Má jeden pár čelních kol s dvojnásobným šikmým ozubením. Ozubení na vstupní hřídeli je 2 x 81 zubů a na výstupní hřídeli 2 x 30 zubů. Převodové ústrojí je složené ze dvou hřídelí, připevněných čtyřmi kluznými ložisky.

Turbokompresor

Otáčky turbokompresoru jsou 4050 ot·min⁻¹. Je složené ze dvou lopatkových kol, každé o obsahu 20 lopatek. Turbokompresor je uložen v ložiskových pánvích.



Obrázek 18 – Rozebraný turbokompresor



Obrázek 19 – Rozebraný rotor turbokompresoru

Kluzná ložiska



Obrázek 20 – Rozebraná kluzná ložiska

7.2 Příprava měření

Pro tvorbu této kapitoly byla použita literatura [11]

Jako měřicí zařízení byl použit akcelerometr, připevněn pomocí permanentního magnetu k měřicímu zařízení Adash A44 00VA4 PRO. Jedná se o čtyřkanálový analyzátor, vybavený základními moduly analyzátoru, datakolektoru a rekordéru měřených signálů. Kromě těchto základních modulů, obsahuje ještě další moduly pro provozní vyvažování

strojů, měření rozběhů a doběhů, ultrazvuku, rázové testy, kontrolu mazání, akustická měření, poslech vibračního signálu a modul pro provozní tvary kmitů. My jsme se zabývali modulem rekordér měřených signálů, pomocí kterého jsme změřili hodnoty vibrací na stroji. Zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot jsme provedli v modulu Analyzátor, pomocí softwaru Virtual Unit, od stejné firmy.



Obrázek 22 – Měřící zařízení Adash VA4 Pro [11]



Obrázek 23 – Měření vibrací na turbokompresoru

7.3 Výběr Měřících míst

Pro dosažení co nejlepších výsledků jsme měřili vždy ve třech směrech. Ve vertikálním (svisle kolmo k ose rotaci), horizontálním (vodorovně kolmo na osu rotace) a axiálním (rovnoběžně s osou rotace). Měřeno bylo na osmi místech, konkrétně na osmi

kluzných ložiscích, označených L1 až L8. Na elektromotoru ložiska L1-L2, na převodovce L3-L6 a na turbokompresoru L7-L8, vždy na pevných, nerotujících částech.

Snímače je potřeba umístit co nejbližší k místu kde vznikají vibrace, ideálně přímo na materiál, který je v kontaktu s ložiskem, aby došlo k co nejmenšímu útlumu vibrací. K utlumení, nebo taky rezonanci může dojít nevhodným umístěním snímačů, jako jsou např. kryty skříní nebo přechody. Místo dosedací plochy snímače musí být čisté, aby signál nebyl zkreslen.

7.4 Výpočet otáčkových frekvencí

Pro zanalyzování naměřených hodnot je potřeba provést některé výpočty. Jedná se o určení lopatkových, rotorových a zubových frekvencí. K tomu je potřeba znát technické údaje daného stroje, jako jsou počty lopatek, zubů a otáčky.

Otáčková frekvence motoru

$$f_m = \frac{n_1}{60} = \frac{1480}{60} = 24,66 \text{ Hz} \quad (7.1)$$

Kde je:

n_1 – otáčky motoru.

Otáčková frekvence vstupní hřídele převodovky

$$f_{vs} = \frac{n_2}{60} = \frac{1480}{60} = 24,66 \text{ Hz} \quad (7.2)$$

Kde je:

n_2 – otáčky vstupní hřídele převodovky.

Otáčková frekvence výstupní hřídele převodovky

$$f_{vys} = \frac{n_3}{60} = \frac{4050}{60} = 67,5 \text{ Hz} \quad (7.3)$$

Kde je:

n_3 – otáčky výstupní hřídele převodovky.

Otáčková frekvence turbíny

$$f_t = \frac{n_3}{60} = \frac{4050}{60} = 67,5 \text{ Hz} \quad (7.4)$$

Kde je:

n_3 – otáčky výstupní hřídele převodovky.

Otáčková frekvence spoluzabírajících ozubených kol

$$f_{oz} = \frac{n_1 \cdot z_1}{60} = \frac{1480 \cdot 81}{60} = 1998 \text{ Hz} \quad (7.5)$$

Kde je:

n_1 – otáčky motoru;

z_1 – počet zubů ozubeného kola na vstupní hřídeli.

Vypočítané otáčkové frekvence nám poslouží ke srovnání s hodnotami vibrací při určité otáčkové frekvenci na frekvenčních spektrech.

V tabulce 4 jsou uvedeny vypočítané otáčkové frekvence jednotlivých částí ústrojí a skutečné otáčkové frekvence, které jsme zjistili podle frekvenčních spekter.

Tabulka 4 – Otáčkové frekvence jednotlivých částí soustrojí

Část stroje	Vypočítaná otáčková frekvence [Hz]	Skutečná otáčková frekvence [Hz]
Motor	24,66	24,8
Vstupní hřídel	24,66	24,8
Ozubené soukolí	1998	2009
Výstupní hřídel	67,5	67
Turbína	67,5	67

7.5 Vyhodnocení měření

Bylo provedeno jedno měření na jednom ze tří turbokompresorů, které se v koksovně nacházejí. Vždy je jeden v provozu a zbylé dva jsou záložní. Měřili jsme rychlost a zrychlení vibrací.

Rychlost byla měřena v nízkofrekvenčním pásmu, zrychlení ve vysokofrekvenčním pásmu. Měřit lze také v širokofrekvenčním pásmu. Tento typ měření není pro nás vhodný, protože nás upozorní pouze na změnu stavu, kdežto pomocí nízkofrekvenčního či vysokofrekvenčního pásma jsme schopni zjistit konkrétní příčinu závady.

Měřeno bylo dle platné normy ČSN ISO 10816-3. Tato norma platí pro soustrojí, které jsou poháněny elektromotorem, nebo parní turbínou s výkonem na 15 kW a otáčkami mezi 120-5000 ot·min⁻¹. Dále podle normy jsou ještě stroje rozděleny do čtyř skupin podle parametrů měřeného stroje. Naše měřené zařízení spadá do první skupiny strojů, která je určena pro středně velké stroje o výkonu 300 kW – 50 MW, nebo elektrické stroje s výškou hřídele nad 315 mm.

7.5.1 Spektrum rychlosti

Rychlost vibrací byla měřena v rozmezí 10 Hz až 1000 Hz v jednotkách mm·s⁻¹ dle normy ISO 816-3. Tohle rozmezí udává, že jde o nízkofrekvenční měření, které slouží pro zjištění mechanických závad, jako je nesouosost (vzájemné vychýlení nebo posunutí hnací a hnané hřídele), nevyvaha, mechanická uvolnění (špatné uložení stroje, např.: vadné podloží základu stroje, uvolněné kotevní šrouby, uvolnění spojů na konstrukci soustrojí), prohnutý hřídel, trhlina v hřídeli, nebo víření olejového filmu v kluzném ložisku.

7.5.2 Spektrum zrychlení

Pro zrychlení vibrací bylo aplikováno měření ve vysokofrekvenčním pásmu od 500 Hz do 25600 Hz. V tomto pásmu jsme schopni zjistit závady jako je poškození ozubeného soukolí, přidírání hřídele, poškození ložisek, nebo problémy s mazáním.

7.6 Tabulky mezních hodnot

Jako vodítko k určení, zda jsou vibrace v přijatelných mezích, nebo dosahují větších hodnot, slouží tabulka mezních efektivních hodnot rychlostí a zrychlení dle ČSN ISO 10 816-3.

Tabulka 5 – Mezní efektivní hodnoty rychlosti vibrací dle ČSN ISO 10 816-3

Tabulka doporučených mezních hodnot efektivních rychlostí vibrací dle ČSN ISO 10 816-3	
Označení pás- sem	Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm·s ⁻¹]
A/B	2,3
B/C	4,5
C/D	7,1

Tabulka 6 – Mezní efektivní hodnoty zrychlení vibrací dle ČSN ISO 10 816-3

Tabulka doporučených mezních hodnot efektivních zrychlení vibrací	
Označení pás- sem	Efektivní hodnota zrychlení vibrací [g]
A/B	0,5
B/C	1,5
C/D	4

Pásmo A: Nacházejí se zde vibrace nových strojů.

Pásmo B: V tomto pásmu mohou stroje být provozovány po neomezenou dobu.

Pásmo C: Stroje s vibracemi v tomto pásmu, není příliš vhodné provozovat pro trvalý provoz. Provozovány by měli být do té doby, dokud nebude nalezena možnost nápravy.

Pásmo D: Vibrace na stroji v tomto pásmu jsou nebezpečné a mohou způsobit poškození stroje.

8. NAMĚŘENÉ HODNOTY Z 15. 3. 2019

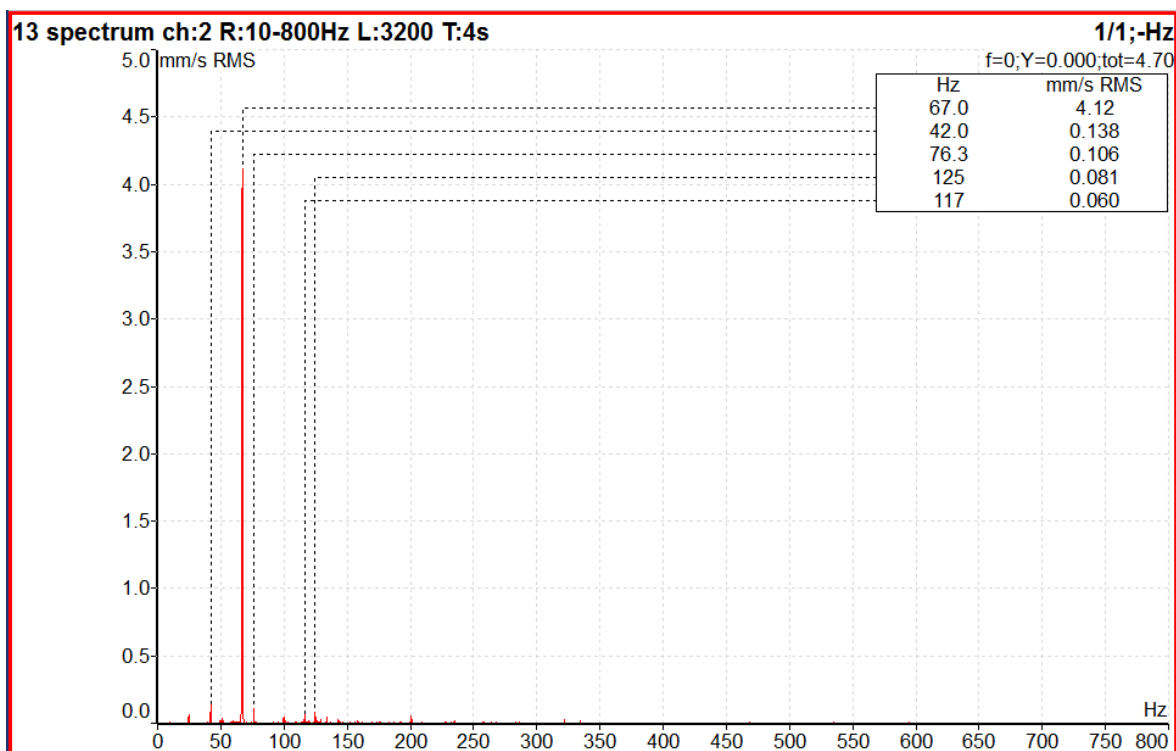
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty efektivních hodnot rychlosti a vibrací

Tabulka efektivních rychlostí vibrací v pásmu od 10Hz do 1000Hz dle ISO 10 816-3 a velikosti efektivních zrychlení vibrací v pásmu od 500Hz po 25 600Hz									
Měřicí místo	Směr	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
v_{RMS}	vertikální	0,81	0,785	0,871	0,992	1,06	1,82	1,33	0,678
	horizontální	4,66	3,52	3,21	3,28	3,1	3,24	3,65	1,36
	axiální	0,567	0,687	1,09	1,29	1,21	1,19	2,15	1,97
a_{RMS}	vertikální	0,344	0,484	1,62	3,42	3,52	2,77	0,366	0,604
	horizontální	0,185	0,25	0,374	0,341	2,05	0,31	0,208	0,25
	axiální	0,375	0,529	0,703	2,27	1,49	4,67	0,386	0,584

Při prvním měření byly zjištěné kritické vibrace zrychlení v axiálním směru na čtvrtém ložisku převodovky. Podle frekvenčního spektra tyto vibrace pochází od ozubeného soukolí. Vzhledem k tomu že turbokompresor měl odpracovaných jen 228 motohodin (k repasi dochází po 10 000 motohodách), je možné, že vibrace se časem zmenší na přijatelnější hodnotu. Při dalším měření bude potřeba zhodnotit vývoj vibrací a provést případnou nápravu.

8.1 Frekvenční spektra

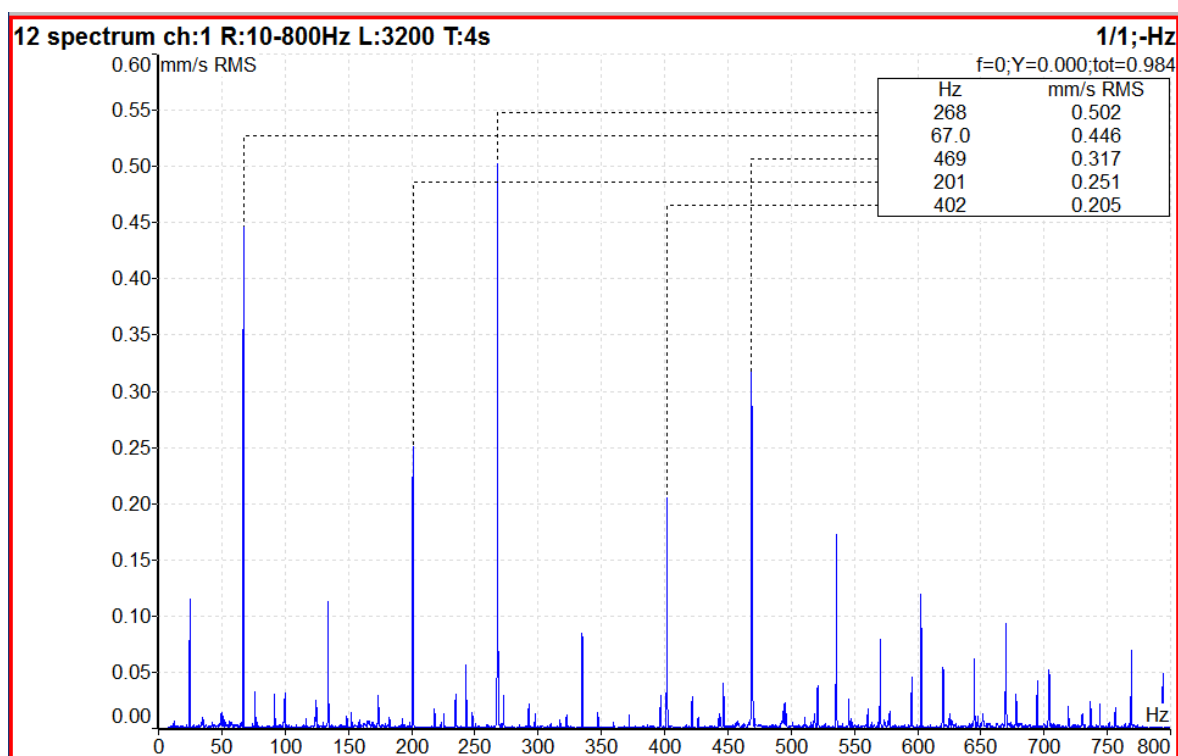
8.1.1 Ložisko L1



Obrázek 24 - Frekvenční spektrum rychlosti v pásmu 1 Hz až 800 Hz v horizontálním směru

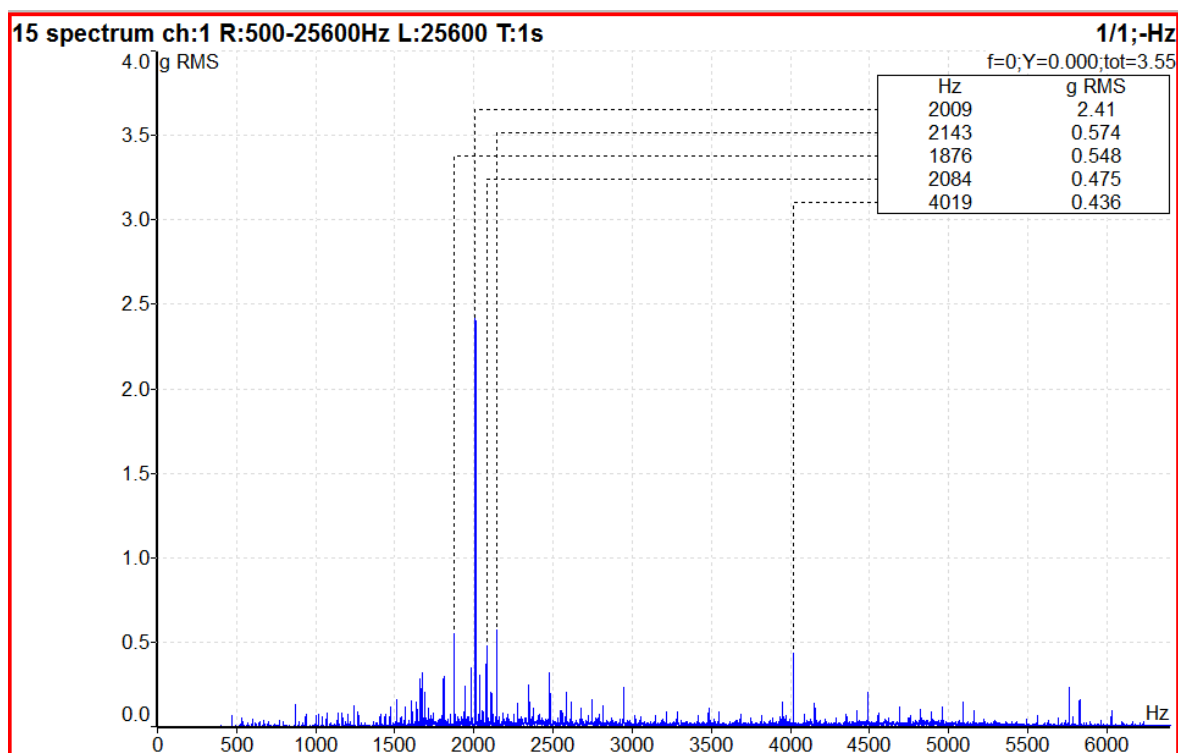
Na frekvenčním spektru je největší frekvence 67 Hz, což bude otáčková frekvence výstupní hřídele převodovky, nebo turbíny. Tato frekvence se nachází na obou ložiskách motoru ve všech třech směrech a s největší pravděpodobností se přenáší rámem z převodovky, nebo z turbíny. V horizontálním směru je tato hodnota vyšší z důvodu vyšší poddajnosti rámu v tomto směru. Každopádně spektra rychlosti ani zrychlení na obou ložiskách elektromotoru nevykazují výraznější problémy, tudíž motor je po mechanické stránce bez závad.

8.1.2 Ložisko L5



Obrázek 25 - Frekvenční spektrum rychlosti v pásmu 10Hz až 800Hz ve vertikálním směru na ložisku L5

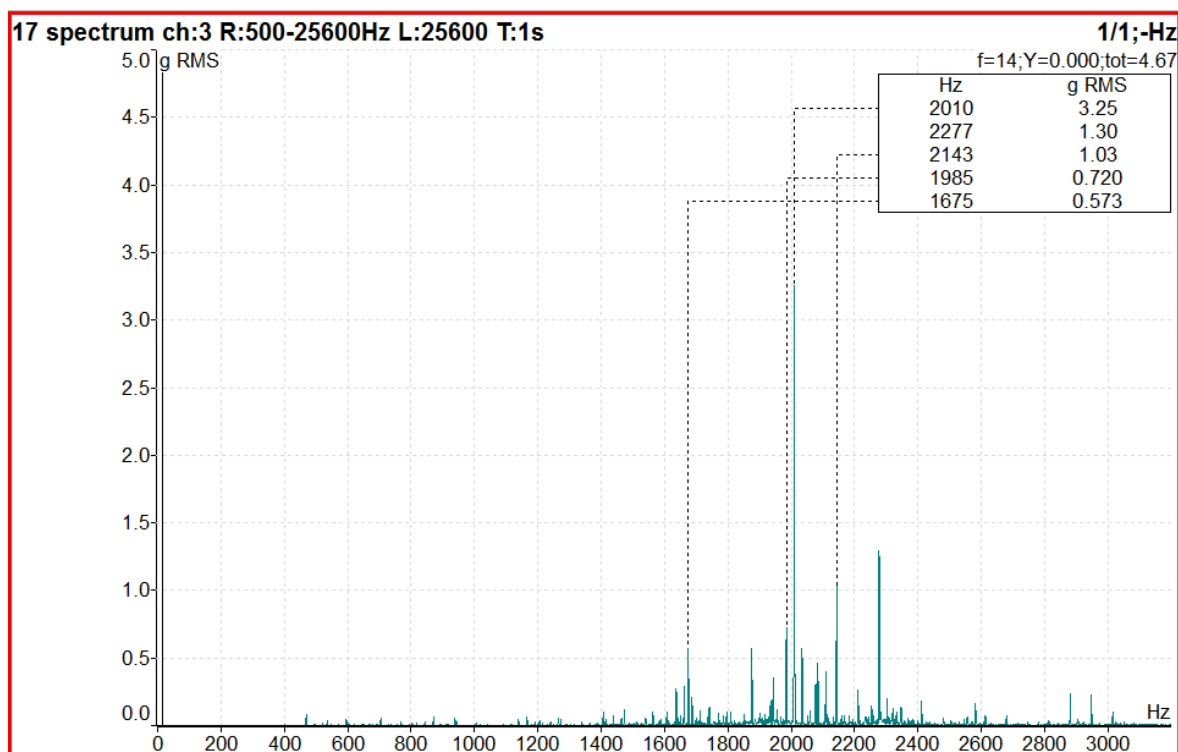
K největší rychlosti vibrací na ložisku L5 od převodovky dochází od otáčkové frekvence turbokompresoru a jeho harmonických násobků. Nachází se ve všech třech směrech měření, ovšem hodnoty jsou tak malé, že stroj zde nevykazuje žádné známky poškození.



Obrázek 26 - Frekvenční spektrum zrychlení v pásmu 500 Hz až 25600 Hz ve vertikálním směru na Ložisku L5

Na frekvenčním spektru zrychlení vibrací ve všech směrech je dominantní zubová frekvence převodu. Hodnoty jsou v požadovaných hodnotách, nenachází se zde žádná porucha.

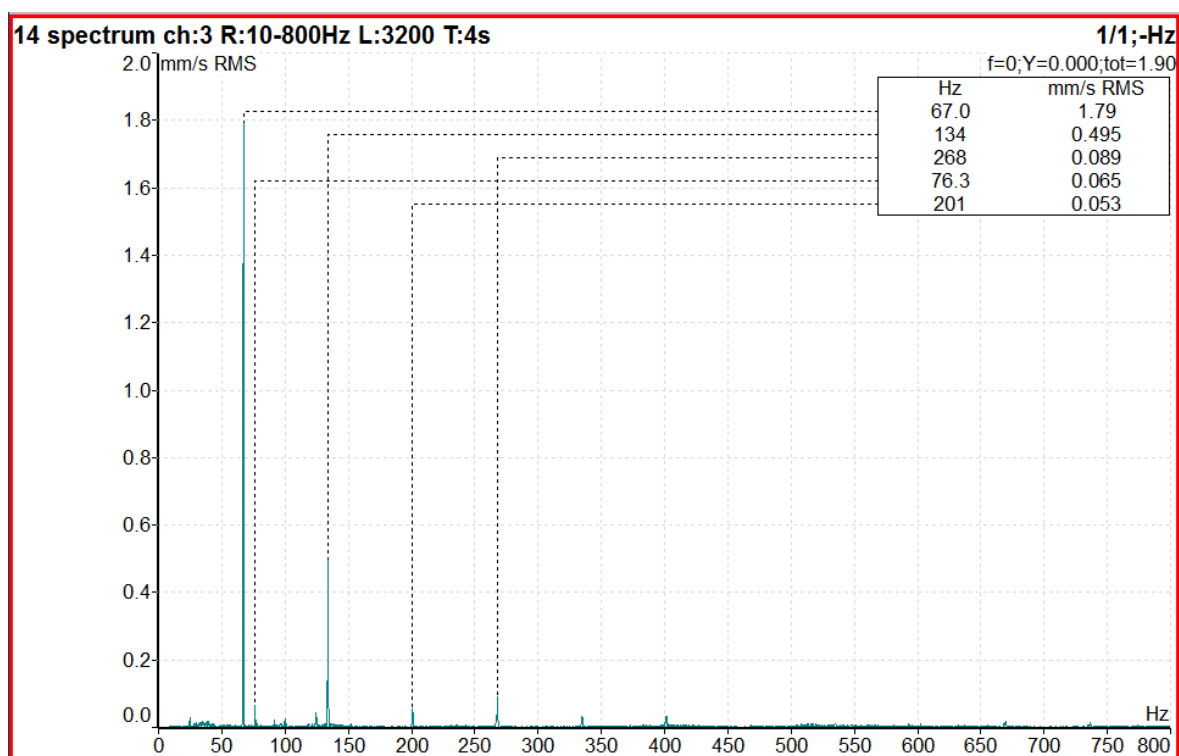
8.1.3 Ložisko L6



Obrázek 27 - Frekvenční spektrum zrychlení v pásmu 500 Hz až 25600 Hz v axiálním směru na ložisku L6

Ve frekvenčním spektru lze vidět maximální kmitočet 2010 Hz, což je zubová frekvence spoluzabírajících ozubených kol. Snímačem bylo naměřeno největší zrychlení vibrací 4,67 g, což už je kritická hodnota. Příčinou jsou vibrace od ozubeného soukolí.

8.1.4 Ložisko L8



Obrázek 28 – Frekvenční spektrum rychlosti v pásmu 10 Hz až 800 Hz v axiálním směru na ložisku L8

Na frekvenčním spektru turbokompresoru jsou viditelné malé vibrace právě od otáčkové frekvence turbíny a její harmonické násobky. Hodnoty jsou v mezích a nevykazují žádné poruchy jak ve spektru rychlosti vibrací, tak také ve zrychlení vibrací na obou ložiscích turbokompresoru.

9. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zhodnotit technický stav turbokompresoru a celého jeho soustrojí v Koksovně Svoboda. Pro vyhodnocení byla zvolena kombinace tribodiagnostiky a vibrodiagnostiky. Oběma zmíněnými metodami proběhlo na daném zařízení jedno měření.

Tribodiagnostikou byla zjišťována jak degradace turbínové oleje, kterým je mazán turbokompresor, tak technický stav samotného turbokompresoru. Zjišťovali jsme kinematickou viskozitu při 40°C, kyselost, obsah vody, celkové znečištění, rentgenovou a infračervenou spektrometrii. U celkového znečištění bylo nalezeno poměrně větší množství otěrových částic o velikosti cca 15-50 μm . Jedná se o lesklé neprůhledné částice koksárenského prachu, které se do oleje dostaly z okolí, pravděpodobně z důvodu špatného těsnění stroje. Všechny sledované parametry ale vyhověly doporučeným hodnotám, čímž můžeme usoudit, že turbína se nachází v provozuschopném stavu a lze ji nadále provozovat.

Vibrace na celém soustrojí byly měřeny akcelerometrem, který byl magneticky připevněn a napojen na měřicí zařízení Adash A44 00VA4 PRO.

Při nízkofrekvenčním měření rychlosti vibrací se největší hodnoty nacházely v horizontálním směru. V tomto směru se obecně nejčastěji nacházejí největší vibrace, způsobené poddajností strojů v tomto směru. Zvýšené vibrace by mohly vykazovat známky nevývahy. Frekvence amplitudy na všech ložiscích v tomto směru, jsou na otáčkové frekvenci hřídele turbokompresoru a jejich násobcích. Při větších hodnotách by mohly upozorňovat na zmiňovanou nevývahu, způsobenou nanesením dehtu na oběžném kole turbokompresoru. Ovšem naměřené hodnoty rychlosti spadají do kategorie nových přejímaných strojů, tím pádem lze podle nich usoudit, že stroj nevykazuje známky nevývahy, nebo jiné poruchy. Pouze na prvním ložisku byly nepatrně zvýšené vibrace, způsobené vyšší poddajností rámu elektromotoru.

Hodnoty zrychlení vibrací měřených ve vysokofrekvenčním rozsahu jsou lehce zvýšeny na ložiscích L3-L6, v oblasti převodovky. Jejich velikost může naznačovat vznikající poruchu. Problém bude na ozubeném soukolí, z důvodu výskytu nejvyšších vibrací na frekvenci, která náleží otáčkové frekvenci ozubeného soukolí. Z důvodu malého počtu odpracovaných hodin soustrojí, se ovšem mohou vibrace časem zmenšit a ustálit na nižší přijatelné hodnoty. Při dalším měření bude potřeba se na toto místo zaměřit a zhodnotit vývoj vibrací.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Davidu Šeděnkovi, za pomoc při měření a rady v průběhu tvorby bakalářské práce a podniku Koksovna Svoboda za umožnění měření a poskytnutí informací.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OKK Koksovny, a.s., vítejte ve světě výrobce kvalitního koksu. | OKK. [online]. Dostupné z: <http://koksovny.cz/cz/>
- [2] CHLUMSKÝ, Vladimír a Antonín LIŠKA. Kompresory. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [3] MISÁREK, Dušan. Turbokompresory. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada strojírenské literatury.
- [4] KAMINSKÝ, Jaroslav. Kompresory. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0704-1. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [5] LIŠKA, Antonín. Kompresory. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01145-3. Skripta. České vysoké učení technické v Praze.
- [6] HELEBRANT, František. Technická diagnostika a spolehlivost. II, Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0650-9. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [7] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin, díl 4. ISBN 80-7300-158-6.
- [8] KREIDL, Marcel. Diagnostické systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02349-4.
- [9] HELEBRANT, František. Technická diagnostika a spolehlivost. I, Tribodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-883-6. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [10] Tribotechnika. Přeložil Emil ŠAFR. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [11] A4400 VA4 Pro II – Nejvýkonnější 4-kanálový analyzátor | Adash. Master the Language of Your Machinery | Adash [online]. Copyright © 2019 Adash [cit. 16.05.2019]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/prenosne-merici-systemy/a4400-va4-vibracni-analyzator>

[12] Akcelerometry - Vibrodiagnostika - Příslušenství. LAMI KAPPA - analýza vibrací, vyvažování a technická diagnostika [online]. Dostupné z: <http://www.lamikappa.cz/akcelerometry/>